

公益社団法人日本技術士会東北本部応用理学部会

平成24年度研修会

震災後の沿岸岩礁環境の回復～うに井の今後～

吾妻行雄氏 (東北大学大学院農学研究科教授)

講演参考資料

平成24年12月7日(金) 15時~17時

株式会社ユアテック 3階A会議室

## 講師紹介

吾妻行雄（あがつま ゆきお）氏

1954年生れ。福岡県出身。

東北大学大学院農学研究科教授。

78年東北大学農学部卒業。

北海道立水産試験場、北海道原子力環境センターをへて97年東北大学農学部助教授、2010年より現職。

専門はウニと海藻群落の相互作用に関する群集生態学。

ウニの生物学・生態学・水産学に関する著書多数。

2011年日本水産学会水産学進歩賞受賞。

## 津波によるコンブ目褐藻アラメ海中林の被害と再生過程

吾妻行雄、遠藤 光、青木優和（水圏植物生態学分野）

東北地方太平洋南部沿岸の岩礁域において、コンブの仲間の大形褐藻アラメは海中林とよばれる藻場を形成する。アラメは他の海藻と同様に、光合成によって水と二酸化炭素から有機物を生産する生産者である。単位時間、単位面積あたりに有機物を生産する速度（生産速度）は陸上の熱帯雨林に匹敵するほど高い。ここでの主要な漁獲対象種であるエゾアワビとキタムラサキウニは、生産力の高いアラメの脱落あるいは流出藻体を食物として成長や生殖巣の発達が十分に保障されて漁業が成立し、漁業生産が維持されている。現に、キタムラサキウニが漁獲対象の殻径 50mm に達する年齢は、海中林が崩壊した“磯焼け”域に優占する紅藻無節サンゴモ群落では満 7～8 歳に対して、アラメ海中林では満 2 歳と成長は著しく速い (Agatsuma et al. 2005, Agatsuma 2007)。したがって、アラメ海中林の崩壊は、それを食物として依存している植食動物の生物生産を著しく低下させる。

東日本大震災による大きな津波は、沿岸岩礁域に大きな攪乱をもたらしたと想定される。これまで、2004 年のスマトラ沖地震によってもたらされたインド洋津波によって、タイあるいはインドの主に潮間帯における海藻相と海藻の生育場所に大きな影響がもたらされたことが報告されている (Mantri 2005, 2006, Prethep et al. 2008)。しかし、津波が潮下帯における海中林におよぼす影響については、これまで全く明らかにされていなかった。本研究は、高さ 15.9 m の津波が押し寄せて甚大な被害がもたらされた志津川湾に面した南三陸町沿岸において、湾の入り口から湾の奥部まで海岸地形に沿ってアラメの被害を定量的に調べた。そして、得られた結果にもとづいて、海中林の再生過程を以後継続的に調べている。これまでにわかったことと今後の沿岸岩礁域の漁業の復興にむけての課題について指摘する。

### 1. アラメ海中林の被害

2011 年 6 月と 7 月に、志津川湾の湾口から湾奥部にいたる岩礁域において、エゾアワビとキタムラサキウニの漁場であるアラメが優占して海中林を形成している 12 地点を選定した。各地点で鉛入りロープ 1 本を海底に敷設し、スキュ

ーバ潜水によってロープに沿って1 m幅で5 m 間隔、水深1~7 m までのアラムの本数を葉状部の損失、枝の切断、茎の切断あるいは茎が損失して仮根部のみが残存する損傷個体 (図1 A-C) を正常な個体と区別して計数した。なお、枝と茎に新しい髄質が観察される個体を津波による損傷と判断した。また、同様にロープに沿って1 m 幅で生息するキタムラサキウニの個体数をアラメ群落とそれに続く無節サンゴモ群落に分けて調べた。さらに、ロープから水平距離1 m 以内の海底に泥が堆積して完全に底面が被われている水深を記録した。

各地点において、アラムの損傷した個体の比率には1 m 毎の水深間でほぼ有意な差はみとめられなかった。しかし、各地点のアラムの全密度には地点間で有意な差がみとめられ、湾口部と湾中部では損傷した個体は正常な個体よりも少なかったのに対して、湾奥部ほど損傷した個体が多く、その比率は最奥部で最大75%に達した (図1 D)。湾奥ほどエネルギーが増幅する津波の特徴であると考えられる。通常の嵐では浅所ほど海中林への影響が大きくなる (Seymour et al. 1989, Dayton et al. 1992, Graham 1997) のとは全く異なる。アラムは1~3月の冬季に波浪によって藻体が仮根部も含めて消失することがある (谷口・鬼頭 1988) ことから、津波によるアラムの被害はさらに大きかったと考えられる。キタムラサキウニのアラム海中林内の密度は湾口部で2.0~2.2 個体/m<sup>2</sup>、

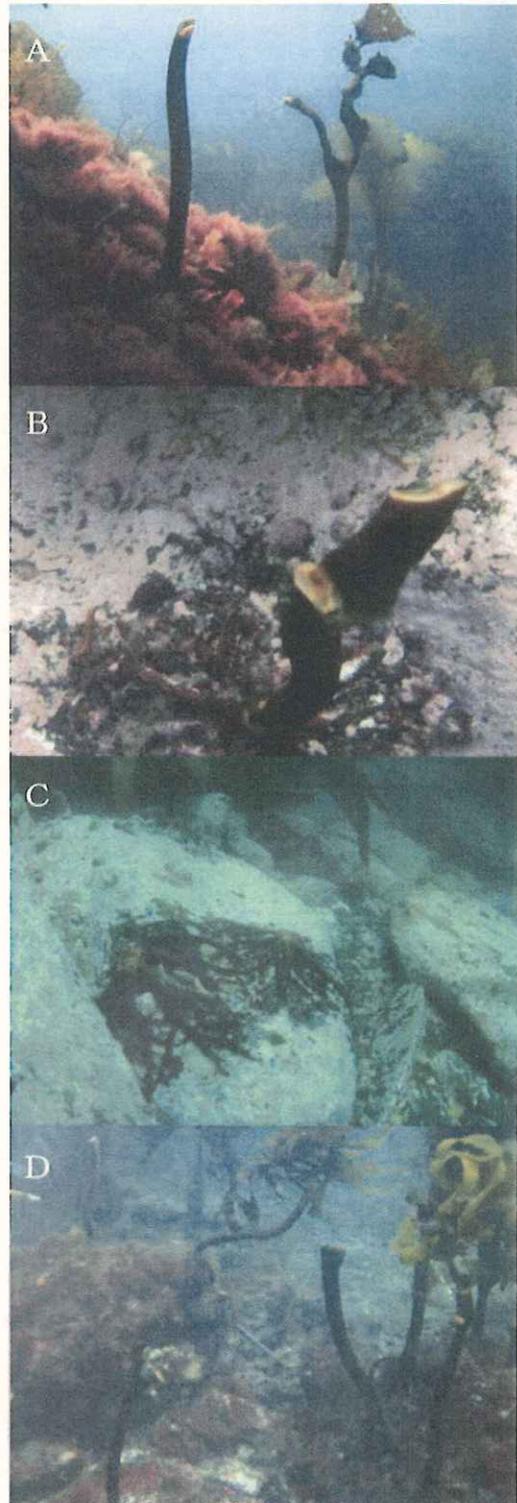


図1. 津波によって損傷したアラム

周年最も密度の高い無節サンゴモ群落では 4.6~6.7 個体/m<sup>2</sup>に対して、湾奥部では著しく低下し、最奥部ではいずれの群落においてもキタムラサキウニの生息はみとめられなかった。また、湾最奥部とそれに近接した2地点において、水深3mあるいは5m以深で砂泥の堆積がみとめられた。

## 2. アラメ海中林の再生過程

アラメ海中林の再生過程を把握するために、2011年8月に、最もアラメの被害の大きかった湾最奥部において、海岸線に平行に20m、アラメの生育下限である水深7mに相当する沖出し80mの1,600m<sup>2</sup>を対象に海底の岩盤に水中ボンドとアイプレートを接着して永久実験区とした。

アラメが成熟期に相当する8月以降、地盤沈下によって新たに形成された水深1m以浅の浅所に一枚の葉状部(単葉)をもつ幼体が多数出現した(図2A)。9月から10月にかけてカジメ型の幼体(図2B)へと多数生長し、群落が浅所に拡大しているのが観察された。一方、アラメの下限域においても単葉の幼体は出現した。しかし、その数は浅所より少なく、カジメ型へは

生長できずに10月には消失した。下限域周辺では、アラメが加入できず、成体も死亡していくのかもしれない。8月以降も下限域より沖合の無節サンゴモ群落には厚さ約10cmの砂泥が堆積していた。

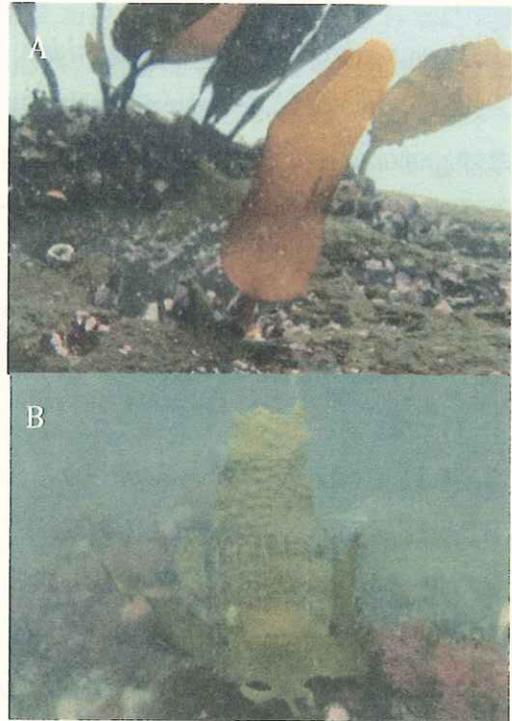


図2. 単葉およびカジメ型幼体

## 3. 今後の課題

砂泥の堆積は海藻の発芽とウニ稚仔およびアワビ稚貝の加入に負の影響をもたらす(Airolidi 2003, Phillips et al. 2006, Onitsuka et al. 2008)。アラメの遊走子の着底と、それに続く配偶体の生育は砂泥の堆積によって阻害されることが報告されている(Arakawa 2005)。また、無節サンゴモ群落はウニ・アワビ幼生が着底・変態する場所である(Cameron and Schroeter 1980, MaShane

1992 など)。そこに砂泥が堆積すると加入できない。湾奥部の泥を土木的な手法も含めて排除する必要がある。

今後、アラメ海中林の新規加入群と成体群の密度と生残を水温、光量、砂泥の堆積など無機環境要因と対応させて継続して調べて再生過程を明らかにしていくとともに、ウニ、アワビ資源の回復に向けた方策をみいだしたい。

#### 文献

1. Y. Agatsuma, in *Edible sea urchins: Biology and Ecology. Second edition*. J.M. Lawrence (ed.), Elsevier, Amsterdam, pp. 443-457. (2007).
2. Agatsuma, M. Sato, K. Taniguchi, *Aquaculture* **249**, 449-458 (2005).
3. L. Airoidi, *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.* **41**, 161-236 (2003).
4. H. Arakawa, *Fish. Sci.* **71**, 133-140 (2005).
5. R. A. Cameron, S. C. Schroeter, *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **2**, 243-247 (1980).
6. P. K. Dayton, M. J. Tegner, P. E. Parnell, P. B. Edwards, *Ecol. Monogr.* **62**, 421-445 (1992).
7. M. H. Graham, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **218**, 127-149 (1997).
8. V. A. Mantri, *Curr. Sci.* **89**, 1071-1072 (2005).
9. V. A. Mantri, *J. Earth Syst. Sci.* **115**, 371-378 (2006).
10. P. E. McShane, in *Abalone of the world: biology, fisheries, and culture*, S. A. Shepherd, M. J. Tegner, S. A. Guzman, Eds. (Blackwell, Oxford, 1992), pp. 120-130.
11. T. Onitsuka *et al.*, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **365**, 53-58 (2008).
12. N. E. Phillips, J. S. Shima, *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **314**, 149-158 (2006).
13. A. Prethep, J. Mayakun, P. Tantiprapas, A. Darakrai, *J. Appl. Phycol.* **20**, 907-914 (2008).
14. R. J. Seymour, M. J. Tegner, P. K. Dayton, P. E. Parnell, *Estuar. Coast Shelf Sci.* **28**, 277-292 (1989).
15. 谷口和也, 鬼頭 鈞, 日水誌, **54**, 1583-1588 (1988).

## ウニ—海藻群落との密接な関係にせまる—



東北大学大学院農学研究科 教授 吾妻 行雄

### 1. はじめに

ウニは約 4 億 6500 万年前の古生代オルドビス紀中期に出現し、古生代末に起こった生物史上最大の大量絶滅を生き抜いた 1 属から中生代最初の三畳紀（約 2 億 5000 万年前～2 億年前）の末に大きな適応放散を遂げた。そして、現代にいたる主要な系統が生み出された。他の棘皮動物と同様に陸上と淡水域には進出できなかったものの海産無脊椎動物の中では繁栄した動物群である。現在、世界で約 950 種、日本で約 160 種が確認されており、熱帯から寒帯にいたる世界中の潮間帯から水深 7000 m にいたる深海まで分布する。20 数種が主要な食用となり、ほとんどがホンウニ目に属する（表 1）。いずれも沿岸の岩礁域に分布して、生育あるいは流出した海藻を主に摂食する植食動物である。

食用ウニの中で種によっては密度が増加すると、その摂食圧によって海中林とよばれる大形のコンブ目褐藻の現存量を著しく減少させ、崩壊させることが古くから報告されてきた<sup>1)</sup>。沿岸岩礁生態系は海中林と無節サンゴモ群落を生産者とする生物の種組成と種間のネットワークの異なる生物群集を対極として、動的に交代することが世界で共通してみとめられている。日本では海中林から無節サンゴモ群落への交代は、生産力と種多様性の低下によって水産業の損失をもたらす“磯焼け”とよばれる。どのようなしくみで生産者である海藻群落交代するのか。一次消費者であるウニは群落の交代にどのように関わり、個体群をどのように維持しているのか。古くから多くの研究が行われてきた代表的な海域においてそれを説明するとともに、著者らが研究してきた北日本沿岸におけるウニと海藻群落の密接な関係について紹介する。

### 2. 海外における海藻群落の交代要因

アラスカ州のアリューシャン列島の島々では、ラッコの生息の有無によって生物群集が全く異なる。ラッコはウニの天敵である。ラッコが生息する島では、海表面に林冠をなすオニワカメ、次いで 4 種のコンブ属、

そしてアナメからなるコンブ目褐藻群落の階層構造がみとめられる<sup>2)</sup>。ラッコがいない島では、チシマオオバフンウニの高密度な個体群が大形海藻を摂食して排除してしまう。ラッコは下位の栄養食者に影響を与えて群集の構造を決定する明確な上位の食地位にある捕食者として位置づけられている<sup>3)</sup>。アリューシャン列島の島々には、約 2500 年前に先住民のアリュート族が入植した。かれらの貝塚にはラッコの骨とウニの棘や殻の層が明確に分離して認められ、約 2000 年前までに、ラッコの捕獲によってコンブ目海中林群集からウニの優占する群集への変化が裏付けられている<sup>3)</sup>。また、1990 年後半より、ハクジラ亜目のシャチが食物をアザラシやアシカからラッコへと替えたことによって<sup>4)</sup>、ラッコが減少して海中林群集からウニが優占する群集へと交代している。

北米東部メイン湾では、ラッコに代わるウニの捕食者は大西洋タラである。しかし、大西洋タラは漁業の発展によって 1940 年までに減少した。捕食者の減少によって 1960 年から 25 年間ホクヨウオオバフンウニが増加し、その摂食圧によってコンブ群落崩壊した。しかし、1987 年から日本への輸出を目的としたウニ漁業の急速な発展によってウニの個体数が減少してコンブ群落が回復した<sup>5)</sup>。

大西洋タラは、カナダ大西洋ノバスコシア沿岸においても高い漁獲圧によって 1930 年代までにほぼ消滅した。ここでは、無節サンゴモ群落にホクヨウオオバフンウニが高密度で生息する。高水温となる夏季に時として南方から外来する原生動物が寄生して引き起こされる病気によってウニが大量に死亡し、コンブ群落崩壊する<sup>6)</sup>。しかし、ウニの浮遊幼生期に相当する春季に水温が高い年には、浮遊期間が短縮されることによって幼生の生残率が向上し、稚仔の大きな加入がもたらされる<sup>7)</sup>。そして、形成された大きな個体群の高い摂食圧によってコンブ群落を破壊して無節サンゴモ群落へと交代させる。摂食活動によって形成される 1 m<sup>2</sup> 当たり数百個体に達する幅 1～2 m の濃密なウニの集合体は摂食前線（図 1）とよばれ、コンブ群落を食い尽

表1 世界の主要な食用ウニ

ガンガゼ目	ガンガゼ科	<i>Centrostephanus rodgersii</i>	オーストラリアアスナロガンガゼ
		<i>Diadema setosum</i>	ガンガゼ
ホンウニモドキ目	ホンウニモドキ科	<i>Glyptocidaris crenularis</i>	ツガルウニ
ホンウニ目	ホンウニ科	<i>Echinus esculentus</i>	ヨーロッパオオウニ
		<i>Loxechinus albus</i>	チリウニ
		<i>Paracentrotus lividus</i>	ヨーロッパムラサキウニ
		<i>Psammechinus miliaris</i>	ヨーロッパバフンウニ
	ナガウニ科	<i>Anthocidaris crassispina</i>	ムラサキウニ
		<i>Evechinus chloroticus</i>	ニュージーランドウニ
		<i>Heliocidaris erythrogramma</i>	オーストラリアミナミムラサキウニ
		<i>H. tuberculata</i>	オーストラリアムラサキウニ
	オオバフンウニ科	<i>Strongylocentrotus nudus</i>	キタムラサキウニ
		<i>S. intermedius</i>	エゾバフンウニ
		<i>S. purpuratus</i>	アメリカムラサキウニ
		<i>S. droebachiensis</i>	ホクヨウオオバフンウニ
		<i>S. franciscanus</i>	オオキタムラサキウニ
		<i>Hemicentrotus pulcherrimus</i>	バフンウニ
	ラッパウニ科	<i>Lytechinus variegatus</i>	アメリカシロウニ
		<i>Pseudocentrotus deopressus</i>	アカウニ
		<i>Tripneustes gratilla</i>	シラヒゲウニ
		<i>T. ventricosus</i>	タイセイヨウシラヒゲウニ



図1 ホクヨウオオバフンウニの摂食前線  
Robert Scheibling 博士より提供

くしながら月に 1 ~ 4 m の速度で岸側へと移っていく。ウニの密度は夏季に増加し、冬季に低下しながらも前線は周年形成され、その長さは数百 m から数 km にもおよぶ<sup>8)</sup>。

この沿岸では 1990 年後半より、外来の固着性の葉上動物である触手動物門コケムシ綱アミメコケムシ科の 1 種が侵入し、コンブの葉状部を覆って殻状化することで波浪によるコンブ海中林の崩壊を促進させた<sup>9)</sup>。また、ウニの大量死亡後に外来種の緑藻ミルが侵入して、コンブ群落形成されずにいる<sup>10)</sup>。

北米太平洋カリフォルニア沿岸では、ジャイアントケルプとよばれる巨形のコンブ目褐藻オオウキモが優

占する海中林が形成される。ジャイアントケルプ海中林における生物群集は地球上で最も多様で、生産力の高い生態系の一つに挙げられている<sup>11)</sup>。海中林の林床では、オオキタムラサキウニとアメリカムラサキウニが隠蔽的に住み場に待機して、ほとんど移動せずに海中林から豊富に供給される流れ藻を捕らえて摂食する。エルニーニョ現象によって、高水温・貧栄養な赤道周辺の水塊が接岸すると、ジャイアントケルプは生理的な閾値を超えて死亡する<sup>12)</sup>。エルニーニョ現象あるいはそれともなう大きな嵐のような自然の攪乱は流れ藻の著しい減少をもたらす。その結果、ウニはそれまでの待機型摂食様式から活発な探索型の摂食様式へと切り替わる。生存した海中林に対し、摂食のために集合した前線の先端にはオオキタムラサキウニ、その背後に密着して個体数を増加させるアメリカムラサキウニが前線を形成して、月に約 10 m の速度で進むことがある<sup>13)</sup>。前線の背後には、無節サンゴモ群落が残るのである。

ここでは、高水温・貧栄養あるいは低水温・富栄養をもたらすエルニーニョやラニーニャ現象に代表される海況条件を介して、対極する群集が交代している<sup>14)</sup>。ウニ漁業の爆発的な発展によりウニの個体数が著しく減少した 1983 年には、発生したエルニーニョによってウニの摂食圧が低くても海中林はほぼ壊滅した<sup>15)</sup>。

### 3. 北日本における海藻群落の交代要因

北日本沿岸の無節サンゴモ群落には、キタムラサキウニが高い密度で生息する。その景観はウニが磯焼けを引き起こしたと思わせる。しかし、ウニ個体群の高

い摂食圧による海中林の崩壊、すなわち磯焼けが発生した事実はない。三陸・常磐沿岸の潮下帯岩礁域の動態は“サイクリック遷移”のモデルで説明される<sup>16)</sup>。高水温・貧栄養の海況条件ではコンブ目海中林は死亡する。コンブ目褐藻アラメは春季から夏季の成長期に物質を十分に蓄積できず、秋季の成熟期に大量に物質を消費し<sup>17)</sup> 多数死亡して磯焼けが発生する。そして、ギャップとよばれる空き地が拡大し、林床をなす無節サンゴモ群落<sup>18)</sup>が拡大する。そこではキタムラサキウニの密度が増加して、その摂食圧によって他の海藻の入植が阻害され、摂食耐性のある無節サンゴモ群落<sup>19)</sup>が持続する。磯焼け発生後も高水温・貧栄養が続くと、マコンブは冬季から春季に、幼体では急激に成長が阻害されて死亡し、若齢体では物質の蓄積と成長が阻害され<sup>17)</sup> 加入量が低下し磯焼けが持続する。しかし、海況が低水温・富栄養に転ずると、冬から春には成長の速い小形の1年生海藻が、次いで大形の1年生海藻が生育して植食動物の食物が保障される。また、テルペンなどの化学的防御物質を生産する小形の多年生海藻が生育すると摂食圧が軽減される。いずれの場合も大形の多年生海藻であるアラメなどの発芽が保障されて、海中林が形成されるのである<sup>16, 19)</sup>。このように北日本の沿岸岩礁域においては、遷移は海況変動を引き金として極相の海中林に向かって進行あるいは始相の無節サンゴモ群落へと退行して変動する。

#### 4. ウニの海藻群落への共生

##### 1) ウニ個体群の制御

ウニの着底稚仔は無節サンゴモ群落で多く、コンブ目褐藻群落では少ないことは世界で広くみとめられる<sup>20)</sup>。無節サンゴモが放出するジプロモメタンは、キタムラサキウニ幼生の着底・変態を強く誘起する<sup>21)</sup>。エゾバフンウニとキタムラサキウニの8腕後期幼生は、60 ppm以下の低濃度でジプロモメタンに5～10分被曝されると1時間後に80%以上が変態する<sup>22)</sup>。短時間で高率に変態が誘起されることは、死亡を軽減して稚仔の加入の成功に寄与していると考えられる。すなわち、海中林が崩壊して無節サンゴモ群落が拡大するとウニが増えるのは、稚仔の加入が保障されるからである。一方、生育するコンブ目褐藻クロメやアラメが海水中に分泌する2,4ジプロモフェノールと2,4,6トリプロモフェノール<sup>23)</sup>は20 ppm以下の低濃度でキタムラサキウニ8腕後期幼生を死亡させ、変態をも阻害する<sup>24)</sup>。海中林を構成するコンブ目褐藻群落は摂食を阻害するポリフェノールも生産する<sup>19)</sup> ことから、植食動物に対し

て二重に化学防御をしているといえる。これらの事実は、海藻がアレロケミカルを介してウニの個体群サイズを調節することを示している。

##### 2) ウニ個体群の成長と維持・増大

北海道南部沿岸において、コンブ目褐藻の高い現存量はキタムラサキウニの成長と生殖巣の量的な発達を促進する。浮遊幼生期に相当する9月の水温が20°C以上の高い年には翌年の無節サンゴモ群落における稚仔の加入量が多くなって個体群が成長する<sup>25)</sup>。ホクヨウオオバフンウニ同様、浮遊期間が短縮されて稚仔の加入の成功に結びつくと考えられる。しかし、無節サンゴモ群落に加入したウニの成長は遅く、生殖巣は量的な発達が低下して通常は高齢個体でみとめられる褐色化が若齢個体においても発現する<sup>26, 27)</sup>。稚仔の大量の加入があった翌年以降の冬季の水温が低いと、コンブ群落は深所まで拡大し、ウニは成長と生殖巣の量的な発達が促進されて個体群が維持・増大するため漁獲量の増大に結びつくことが明らかになっている<sup>26)</sup>。また、北海道日本海沿岸において、バフンウニが1989年から1991年に大量に加入し(図2)、従来の地理的分



図2 北海道忍路湾に大量に加入したバフンウニ



図3 キタムラサキウニのホソメコンブ群落への索餌移動  
北海道立中央水産試験場より提供

布を北へ 400 km 拡大させた<sup>28)</sup>。産卵から浮遊幼生期に相当する冬季から春季の水温が平年よりも顕著に高く推移したことが南部からの幼生の着底の成功に結びついたと考えられる。現在、本種の北限は礼文島である。北への分布の拡大は温暖化にともなう海藻植生の変化とも対応しているのかもしれない。

### 3) 海藻群落との種間関係

キタムラサキウニは、夏季から秋季に深所の無節サンゴモ群落から浅所のホソメコンブ群落あるいはアラメ群落へ移動し(図3)、冬季に再び無節サンゴモ群落へ移動する<sup>26, 29)</sup>。バフンウニは秋季から冬季に深所の無節サンゴモ群落から浅所の小形海藻群落へと移動し、移動した浅所の岩石下をその後の生活場所とする<sup>30)</sup>。海藻群落への季節的な移動は、成熟・産卵に向けて生殖巣を量的に発達させるための索餌活動である<sup>26, 29, 30)</sup>。群落への索餌移動は、ホクヨウオオバフンウニのように周年摂食前線を形成して群落を崩壊させるものではなく、種固有の生殖の年周期に対応した食物の要求である。一方、男鹿半島沿岸では、キタムラサキウニは深所の無節サンゴモ群落においてフジツボなどを食物として保障されて生殖巣が量的に発達すると浅所のヒバマタ目褐藻群落へは移動しない。バフンウニでは移動する個体と同様に生殖巣が発達して移動しない個体もあることが明らかにされている<sup>31)</sup>。また、始相、途中相、極相にいたる海藻の遷移系列とキタムラサキウニおよびバフンウニの年齢と大きさの成長速度には対応関係がみとめられる<sup>32)</sup>。すなわち、両種の成長速度は海況条件を介して海中林(極相)と無節サンゴモ群落(始相)を対極としてサイクリックな遷移を辿る、北日本沿岸岩礁域の漁場評価の指標となりうる。

これらの研究結果より、北日本沿岸においてウニは海藻群落によって個体数を調節されており、個体群を維持・増大し、季節的に群落へ索餌移動して再生産が保障されていることが示された。すなわち、ウニは海藻群落と共生していると理解される。

## 5. おわりに

地球温暖化は表層の海水温の上昇のみならず、降水量の増加による成層構造の強化によって鉛直混合が弱まり、底層からの豊富な栄養塩の供給を減少させて一次生産を低下させることが懸念される。現に、親潮域では表層の低塩化による成層の強化が確認されている<sup>33)</sup>。北日本沿岸ではコンブ目褐藻の海中林が著しく縮小して磯焼けが進行し、海中林構成種にもコンブ目からヒバマタ目への交代が認められている<sup>34)</sup>。ウニの主たる天

敵がないオーストラリア、ニュージーランドおよびそれらの周辺の島々を含むオーストララシアでは、海藻はウニの摂食に対して化学的に防御し、ウニは海藻の化学防御物質に耐性を獲得する軍拡競走とよばれる“抜きつ抜かれつ”の相互関係が成立している<sup>35)</sup>。北日本沿岸においても、ウニと海中林は軍拡競走の相互作用を通じていずれも生物生産を低下させていくのだろうか。知見の少ないヒバマタ目海中林とウニの種間相互作用を明らかにするための化学生態学的研究が必要である。

一方、バフンウニが年間で最も水温が低く、波浪の高い冬季に表在して索餌活動を可能にさせる機構とコンブ目褐藻の発芽体に及ぼす影響を生態学的、生理学的に解明する必要がある。現に、和歌山県日ノ御崎沿岸ではバフンウニの大量死亡によってアラメ群落が潮間帯から潮下帯上部へわずかではあるが拡大したことが明らかにされている<sup>36)</sup>。

## 文 献

- 1) Lawrence, J. M. On the relationships between marine plants and sea urchins. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 13: 213-286 (1975).
- 2) Dayton, P. K. Experimental studies of algal-canopy interactions in a sea otter dominated kelp community at Amchitka Island, Alaska. *Fish. Bull.*, 73, 230-237 (1975).
- 3) Simenstad, C. A., Estes, J. A. & Kenyon, K. W. Aleuts, sea otters, and alternate stable-state communities. *Science*, 200, 403-411 (1978).
- 4) Estes, J. A., Tinker, M. T., Williams, T. M. & Doak, D. F. Killer whale predation on sea otters linking oceanic and nearshore ecosystems. *Science*, 282, 473-476 (1998).
- 5) Steneck, R. S., Graham, M. H., Bourque, B. J., Corbett, D., Erlandson, J. M., Estes, J. A. & Tegner, M. J. Kelp forest ecosystems: biodiversity, stability, resilience and future. *Env. Cons.*, 29, 436-459 (2002).
- 6) Miller, R. J. Succession in sea urchin and seaweed abundance in Nova Scotia, Canada. *Mar. Biol.*, 84, 275-286 (1985).
- 7) Hart, M. W. & Scheibling, R. E. Heat waves, baby booms, and the destruction of kelp beds by sea urchins. *Mar. Biol.*, 99, 167-176 (1988).
- 8) Scheibling, R. E., Hennigar, A. W. & Balch, T. Destructive grazing, epiphytism, and disease: the dynamics of sea urchin-kelp interactions in Nova Scotia. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 56, 2300-2314 (1999).
- 9) Harris, L. G. & Tyrell, M. C. Changing community states in the Gulf of Maine: synergism between invader, overfishing and climate change. *Biol. Invasions.*, 3, 9-21 (2001).
- 10) Chapman, A. S., Scheibling, R. E. & Chapman, A. R. O. Species introductions and changes in marine vegetation of Atlantic Canada. Claudi, R., Nantel, P. & Muckle-Jeffs, E. (eds), *Alien invaders in Canada's waters, wetlands and forests*. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service Science Branch, Ottawa, pp. 133-148 (2002).
- 11) Mann, K. H. Seaweeds: their productivity and strategy for growth. *Science*, 182, 975-981 (1973).
- 12) Dayton P. K. The structure and regulation of some South American kelp communities. *Ecol. Monogr.*, 55, 447-468 (1985).

- 13) Leighton, D. L., Jones, L. G. & North, W. Ecological relationships between giant kelp and sea urchins in southern California. Young, E. G. & McClachlan, J. L. (eds), Proceedings 5th international seaweed symposium, Oxford, UK, Pergamon Press, Oxford, pp. 141-1153(1966).
- 14) Harrold, C. & Reed, D. C. Food availability, sea urchin grazing, and kelp forest community structure. *Ecology*, 66, 1160-1169(1985).
- 15) Tegner, M. J. & Dayton, P. K. El Niño effects on southern California kelp forest communities. *Adv. Ecol. Res.*, 17, 243-279(1987).
- 16) 谷口和也. 磯焼けを海中林へ 岩礁生態系の世界. 裳華房, 東京. 196 pp.(1998).
- 17) 成田美智子, 吾妻行雄, 荒川久幸. 海中林の形成に及ぼす環境の影響. [磯焼けの科学と修復技術], 谷口和也, 吾妻行雄, 嵯峨直恒 (編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 34-48(2008).
- 18) Littler, M. M. & Litter, D. S. The evolution of thallus form and survival strategies in benthic marine macroalgae: field and laboratory tests of a functional form model. *Am. Nat.*, 116, 25-44(1980).
- 19) 谷口和也, 蔵多一哉, 鈴木 稔. 海藻のケミカルシグナル. 化学と生物, 32, 434-442(1994).
- 20) Rowley, R. J. Settlement and recruitment of sea urchins (*Strongylocentrotus* spp.) in a sea-urchin barren ground and a kelp bed: are populations regulated by settlement or post-settlement processes? *Mar. Biol.*, 100, 435-494(1989).
- 21) Taniguchi, K., Kurata, K., Maruzoi, T. & Suzuki, M. Dibromomethane, a chemical inducer of larval settlement and metamorphosis of the sea urchin *Strongylocentrotus nudus*. *Fish. Sci.*, 60, 795-796(1994).
- 22) Agatsuma, Y., Seki, T., Kurata, K. & Taniguchi, K. Instantaneous effect of dibromomethane on metamorphosis of larvae of the sea urchins *Strongylocentrotus nudus* and *Strongylocentrotus intermedius*. *Aquaculture*, 251, 549-557(2006).
- 23) Shibata, T., Hama, Y., Miyasaki, T., Ito, M. & Nakamura, T. Extracellular secretion of phenolic substances from living brown algae. *J. Appl. Phycol.*, 18, 787-794(2006).
- 24) Agatsuma, Y., Endo, H. & Taniguchi, K. Inhibitory effect of 2,4-dibromophenol and 2,4,6-tribromophenol on larval survival and metamorphosis of the sea urchin *Strongylocentrotus nudus*. *Fis. Sci.*, 74, 837-841(2008).
- 25) Agatsuma, Y., Nakao, S., Motoya, S., Tajima, K. & Miyamoto, T. Relationship between year-to-year fluctuations in recruitment of juvenile sea urchins *Strongylocentrotus nudus* and seawater temperature in southwestern Hokkaido. *Fish. Sci.*, 64, 1-5(1998).
- 26) 吾妻行雄. キタムラサキウニの個体群動態に関する生態学的研究. 北水試研報, 51, 1-66(1997).
- 27) Agatsuma, Y., Sato, M. & Taniguchi, K. Factors causing brown-colored gonads of the sea urchin *Strongylocentrotus nudus* in northern Honshu, Japan. *Aquaculture*, 249, 449-458(2005).
- 28) Agatsuma, Y. & Hoshikawa, H. Northward extension of geographic range of the sea urchin *Hemicentrotus pulcherrimus* in Hokkaido, Japan. *J. Shellfish Res.*, 26, 629-635(2007).
- 29) Sano, M., Omori, M., Taniguchi, K. & Seki, T. Age distribution of the sea urchin *Strongylocentrotus nudus* (A. Agassiz) in relation to algal zonation in a rocky coastal area on Oshika Peninsula, northern Japan. *Fish. Sci.*, 67, 628-639(2001).
- 30) Agatsuma, Y., Yamada, H. & Taniguchi, K. Distribution of the sea urchin *Hemicentrotus pulcherrimus* along a shallow bathymetric gradient in Onagawa Bay in northern Honshu, Japan. *J. Shellfish Res.*, 25, 1027-1036(2006).
- 31) Endo, H., Nakabayashi, N., Agatsuma, Y. & Taniguchi, K. Food of the sea urchins *Strongylocentrotus nudus* and *Hemicentrotus pulcherrimus* associated with vertical distributions in fucoid beds and crustose coralline flats in northern Honshu, Japan. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 352, 125-135(2007).
- 32) Agatsuma, Y., Nakabayashi, N., Miura, N. & Taniguchi, K. Growth and gonad production of the sea urchin *Hemicentrotus pulcherrimus* in the fucoid bed and algal turf in northern Japan. *Mar. Ecol.*, 26, 100-109(2005).
- 33) Ono, T., Tadokoro, K., Midorikawa, T., Nishioka, J. & Saino, T. Multi-decadal decrease of net community production in western subarctic North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, 29, doi: 10.1029/2001GL014332(2002).
- 34) 谷口和也. 海中林. 鷺谷いづみ(編). 消える日本の自然, 恒星社厚生閣, 東京, pp. 210-218(2008).
- 35) Estes, J. A. & Steinberg, P. D. Predation, herbivory, and kelp evolution. *Paleobiology*, 14, 19-36(1988).
- 36) Agatsuma, Y., Hazama, H. & Arakawa, H. Limited recovery of the kelp *Eisenia bicyclis* after population reduction of the sea urchin *Hemicentrotus pulcherrimus* and *Anthocidaris crassispina* on Kii Peninsula, southwestern Japan. *J. Shellfish Res.*, 28, 939-946(2009).

養殖と防疫

魚病関連会議の報告

I. 平成 22 年度養殖衛生管理体制整備事業 太平洋ブロック地域合同検討会

日時：平成 22 年 10 月 21 日 (木)

場所：三重県東京事務所内会議室

出席：ブロック各都県 (千葉県、東京都、神奈川県、静岡県、三重県、和歌山県)、(独) 水産総合研究センター、農林水産省消費・安全局水産安全室、(社) 日本水産資源保護協会

概要：

(1) 各地域の魚病発生状況



# 磯焼けのしくみ

## —海中林に支えられる沿岸岩礁域の生物生産と種多様性の保全

吾妻 行雄 Yukio Agatsuma

東北大学 大学院農学研究科 資源生物科学専攻 水圏植物生態学分野 准教授

沿岸岩礁生態系は、海中林と無節サンゴモ群落を生産者とする構造の異なる生物群集を対極として変動する。高水温・貧栄養の海況下では、コンブ目海中林は生理的な閾値を超えて死亡し磯焼けが発生する。そして、増加するウニの高い摂食圧によって磯焼けは持続する。地球温暖化はコンブ目褐藻の加入も阻止し、海中林の造成を困難にする。



### ① はじめに

沿岸の岩礁域は海洋全体の約0.1%の面積を占めるにすぎない。しかし、光合成によって単位面積あたり1年間に生産する有機物の量はきわめて多く、海洋全体の約10%にも及んでいる。その高い生産力は、「海中林」と呼ばれる大形褐藻群落(図1)が担っている。海中林は、ウニ、アワビ、サザエなど主要な漁獲対象となる底生の植食動物の主要な食物源となる。また、魚類、甲殻類のすみ場、隠れ場、産卵場としての役割を果たす。葉上や根元には、デトライタスの沈着や珪藻など微細藻類の着生によって、それらを食物とする固着性の海綿・刺胞・脊索・触手動物、移動性の甲殻類、腹足類、多毛類などの動物が生息する。これら多様な生物が共存する群集においては、生産者の海藻から消費者へと上位の栄養食

者へ移行する生食連鎖網と、枯死、脱落した藻体が微生物に分解される過程にあるデトライタスから始まる腐食連鎖網によって物質が循環し、エネルギーが流れる。

沿岸岩礁域は海中林の大きな一次生産に支えられて種多様性の高い豊かな生態系として成立し、沿岸漁業の生産を支えているのである。しかし、近年、特にコンブ目海中林が著しく縮小あるいは消失し、生物多様性の低下と沿岸漁業の存続が危惧されている。

### ② 海中林の崩壊

海中林の縮小あるいは消滅は、海中林に生活を依存していた有用な水産動物の消失や成長あるいは生殖巣の発達低下をもたらして沿岸の漁業生産を著しく低下させる。日本では、この現

象を伊豆半島の方言を用いて「磯焼け」と呼ぶ<sup>1)</sup>。谷口<sup>2)</sup>は、磯焼けの原因を、無機環境の変化に起因して生物群集が変化する生態学的な要因と、人間活動による環境破壊に区別すべきことを指摘している。すなわち、生態学的要因は沿岸生物にとって必然的な環境の変化で、可逆的な過程を辿る。しかし、陸上の開発による淡水・濁水の大量流入、海洋汚染による富栄養化や透明度の低下、重油流出事故など人為的な要因は、沿岸生物にとって偶発的な環境変化である。原因が持続するかぎり沿岸生物を死滅に追い込む不可逆的な過程であり、人間自らが原因を取り除かないかぎり海中林は修復できない。

自然現象ではあるが、津波、火山爆發、例外的な洪水・大時化など一時的・激越な環境変化<sup>2)</sup>に起因する海中林の崩壊は偶然性が高く、環境の復元とともに海中林も回復する。海況変動によ





(谷口和也博士より提供)

図1 コンブ目褐藻アラメ海中林 (徳島県海部郡美波町沿岸) と  
ヒバマタ目褐藻アカモク海中林 (宮城県石巻市社美町沿岸)



図2 無節サンゴモ群落 (北海道小樽市志路湾)

る海中林の崩壊後には、最下層に生育する岩面を被覆する殻状の紅藻無節サンゴモが顕在化して、海藻を摂食する主要な植食動物であるウニが優占する「ウニ-サンゴモ群集」あるいは「ウニが優占する荒地」(図2)と呼ばれる、海中林と異なった群集へと交代する。沿岸岩礁生態系は、海中林と、無節サンゴモ群落を生産者とする組成と構造の異なる生物群集を対極として、動的に交代することが世界で共通して認められる。群落(生産者)の交代は、海況(無機環境)、ウニ(植食者)の加入、ならびにウニの天敵(捕食者)を介してもたらされる。

### ③ 海中林と 無節サンゴモ群落の交代

#### 3.1 アリューシャン列島

ラッコはウニを大量に食べる。アラスカ州のアリューシャン列島の島々では、ラッコの生息の有無によって生物群集がまったく異なる。ラッコが生息すると、海表面に林冠をなすオニワカメ、次いで4種のコンブ属、そしてアナメからなるコンブ目褐藻群落の階層構造が認められる<sup>39)</sup>。ラッコがいないと、チシマオオバフンウニの高密度な個体群が大形海藻を摂食して排除するのである。ラッコは、下位の栄養食者に影響を与えて群集の構造を決定する明確な上位の食地位にある捕食者として位置づけられている<sup>40)</sup>。アリューシャン列島の島々には、約2,500年前に先住民のアリュート族が入植した。彼らの貝塚にはラッコの骨とウニの棘と殻の層が明確に分離して認められ、約2,000年前までに、ラッコの捕獲によるコンブ目海中林群集からウニの優占する群



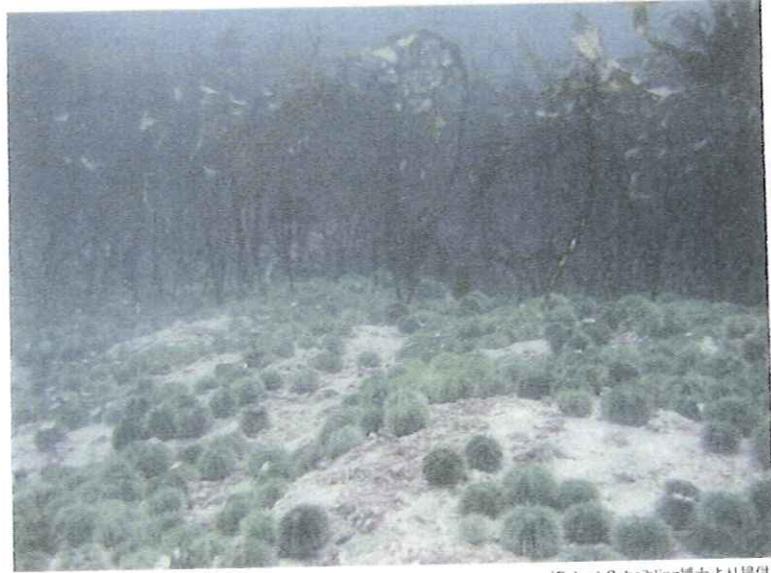
集への変化が裏づけられている<sup>4)</sup>。

また、1990年後半より、ハクジラ垂目のシャチが食物をアザラシやアシカからラッコへと替えたことにより<sup>5)</sup>、ラッコが減少して海中林群集からウニが優占する群集へと交代している。

### 3.2 ノバスコシア

北アメリカ北東部の大西洋沿岸における主たるウニの捕食者は、大西洋タラである。しかし、沿岸域では高い漁獲圧によって1930年代までにはほぼ消滅した<sup>6)</sup>。今でもまれにタラが生息する沖合の島では、ウニが少なく、コンブが繁茂する<sup>7)</sup>。ノバスコシア州沿岸では、無節サンゴモ群集にホクヨウオオバフンウニが高密度で生息する。しかし、高水温となる夏季に時として原生動物が寄生する病気によってウニが大量に死亡し、コンブ群集が回復する<sup>8)</sup>。しかし、ウニは浮遊幼生期に相当する春季に水温が高い年には、浮遊期間が短縮されることによって幼生の生残率が向上し、稚仔の大きな加入をもたらされる<sup>9)</sup>。そして、形成された大きな個体群の高い摂食圧によってコンブ群集を破壊して無節サンゴモ群集へと交代させる。摂食活動によって形成される1 m<sup>2</sup>当たり数百個体に達する幅1~2 mの濃密なウニの集合体は「摂食前線」(図3)と呼ばれ、コンブ群集を食い尽くしながら月に1~4 mの速度で岸側へと移っていく。ウニの密度は夏季に増加し、冬季に低下しながらも前線は周年形成され、その長さは数百m~数kmにも及ぶ<sup>10)</sup>。

近年においては、ウニの摂食圧以外の要因が指摘されている。外来の固着性の葉上動物である触手動物門コケムシ綱のアミメコケムシ科の一種が普及し、コンブの葉状部を覆って殻状化さ



(Robert Scheibling博士より提供)

図3 ノバスコシア州沿岸におけるホクヨウオオバフンウニの摂食前線

せて波浪によるコンブ海中林の崩壊を促進させた<sup>11)</sup>。また、ウニの大量死亡後に外来種の緑藻ミルが侵入して、コンブ群集が形成できずにいる<sup>12)</sup>。

### 3.3 カリフォルニア

カリフォルニア州沿岸では、藻体が100 mにも達する「ジャイアントケルプ」と呼ばれるコンブ目褐藻オオウキモが優占する海中林が形成される。大きな気胞によって海中で藻体を直立させ、海表面を覆って陸上の森林と同様に林冠を形成する。ジャイアントケルプ海中林は地球上で最も多様で、生産力の高い生態系の一つにあげられている<sup>13)</sup>。カリフォルニア南部の海中林内では200種類以上の海藻、無脊椎動物、魚類、哺乳類が普通に認められる<sup>14)</sup>。海中林の林床では、オオキタムラサキウニとアメリカムラサキウニが隠蔽的に住み場に待機して、ほとんど移動せずに海中林から豊富に供給される流れ藻を捕らえて摂食する。エルニーニョ現象によって、高水温、貧栄養な赤道

周辺の水塊が接岸すると、ジャイアントケルプは生理的な閾値を超えて死亡する<sup>15)</sup>。エルニーニョ現象あるいはそれに伴う大きな嵐のような自然の攪乱は、流れ藻の著しい減少をもたらす。その結果、ウニはそれまでの待機型摂食様式から活発な探索型の摂食様式へと切り替わる<sup>16)</sup>。生存した海中林に対し、摂食のために集合した前線の先端にはオオキタムラサキウニ、その背後に密着して個体数を増加させるアメリカムラサキウニが前線を形成して、月に約10 mの速度で進むことがある<sup>16)</sup>。前線の背後には、無節サンゴモ群集が残る。

ウニの大きな加入によって形成された個体群の過剰な摂食によってジャイアントケルプが崩壊し<sup>17)</sup>、ウニが病気<sup>18)</sup>あるいは嵐<sup>19)</sup>によって死亡することによって海中林が再び形成されるとの報告もある。しかし、高水温・貧栄養あるいは低水温・富栄養をもたらすエルニーニョ現象やラニーニャ現象に代表される海況条件を介して対極する群集が交代するモデル<sup>20)</sup>が最も支



持されている。現に、ウニ漁業の爆発的な発展によりウニの個体数が著しく減少したにもかかわらず、1983年には発生したエルニーニョによって海中林はほぼ壊滅した<sup>21)</sup>。

### 3.4 北日本

潮下帯にコンクリートブロックを投入すると、海藻が入植し、その種類も季節によって移り変わるが、法則性ある遷移系列を辿る。遷移は小形から大形へ、短命から長命の海藻へと進行するので、藻体の大きさと寿命に基づいた生活形に分類すると把握できる<sup>22)</sup>。潮下帯では小形一年生海藻と無節サンゴモが優占する始相から、最終的に海中林を構成する大形多年生海藻が優占する極相へと至る遷移の進行系列が認められる<sup>22)</sup>。この系列は、深所の無節サンゴモ群落から浅所に形成される海中林の水深に沿った海藻の帯状構造に対応している。

三陸・常磐沿岸の潮下帯岩礁域の動態は、「サイクリック遷移」のモデルで説明される<sup>23)</sup>。高水温・貧栄養の海況条件では、海中林は死亡して「ギャップ」と呼ばれる空き地が拡大し、後継群の加入量も減少して浅所に縮小、無節サンゴモ群落が拡大する。そこでは、キタムラサキウニの密度が増加する。無節サンゴモが常時多量に分泌する揮発物質ジプロモメタンにウニの変態直前の8腕後期幼生が接触すると、短時間で高率に変態して<sup>23)24)</sup>加入が保障されることによると考えられる。そして、ウニの摂食圧によって他の海藻の入植が阻害され、摂食耐性のある無節サンゴモ群落<sup>25)</sup>が持続する。しかし、海況が低水温・富栄養に転ずると、冬から春には成長の速い小形一年生海藻が、次いで大形一年生海藻が生育して植食

動物の食物が保障される。また、テルペンなどの化学的防御物質を生産する小形多年生海藻が生育すると、摂食圧が軽減されて、いずれの場合も大形多年生海藻のアラメなどの発芽が保障されて、海中林が形成される<sup>22)26)</sup>。海中林は、摂食を阻害するポリフェノールの生産<sup>26)</sup>に加えて、ウニ幼生の変態を阻害して死亡させるプロモフェノールを分泌<sup>27)</sup>して植食動物に対して化学的に防御する。このように、北日本沿岸岩礁域においては、海況変動を引き金として遷移が極相の海中林に向かって進行あるいは始相の無節サンゴモ群落へと退行して変動する。すなわち、沿岸岩礁生態系は不可逆的な人為的要因を除けば、無機環境の変動を介して生産者が交代して、生物種間のネットワークの異なる群集へと動的に変動する有機体であり、磯焼けもその変動の一過程であると理解される。

## 4 磯焼けが発生し、持続するしくみ

日本では、ウニ個体群の高い摂食圧による海中林の崩壊、すなわち磯焼けが発生した事実はない。アラメとカジメは海中林を構成するコンブ目褐藻である。高水温・貧栄養の海況条件下では、アラメは春季～夏季の成長期に物質を十分に蓄積できず、秋季の成熟期に大量に物質を消費して多数死亡し、磯焼けが発生する。アラメとカジメは高水温下では流れのない深所ほど栄養塩の吸収が困難であるため、深所から死亡して浅所に縮小する<sup>28)</sup>。また、貧栄養条件下では細胞を新たに形成できずに早期に細胞が劣化し、高水温や強光条件下では代謝速度が高まって、早期

に藻体内の物質を消費して死亡することが培養実験によって明らかにされている<sup>28)</sup>。

磯焼け発生後も高水温・貧栄養が続くと、ウニの高い摂食圧がその持続に大きく関わる。キタムラサキウニ成体の摂食活動は、生殖周期と密接に関係して季節的に明瞭に変化する。北海道南西部日本海で、対馬暖流の流量の多い高水温・貧栄養の海況条件下では磯焼けが発生し、ホソメコンブ群落は潮間帯にのみ著しく縮小する。キタムラサキウニ成体は、4月～6月に深所の無節サンゴモ群落に生息し、潮間帯から供給される流れ藻を摂食する。流れ藻の供給が途絶える7月以降、成熟・産卵に向けて生殖巣の量的な発達を保障させるために潮間帯のホソメコンブ群落へと移動して生育する藻体を直接摂食する(図4)。そして、一年生のホソメコンブ群落が季節的に消失する11月以降、浅所の強い波浪の影響も受けて、再び無節サンゴモ群落へと移動する<sup>29)</sup>。キタムラサキウニの索餌移動は、ホクヨウオオバフンウニのように周年摂食前線を形成して海中林を崩壊させるものではなく、生殖巣の量的な発達を保障させるための生活年周期に対応した季節的な食物の要求によって起こる。しかし、高水温・貧栄養な海況条件が続くかぎり、潮下帯では食物が保障されずに生殖巣の発達が低下する。そして、成長の遅い小型のウニの高い摂食圧によって無節サンゴモと化学的防御物質を生産する小形多年生海藻<sup>26)</sup>を除く他の海藻の入植が阻害されて磯焼けは持続する。日本では、キタムラサキウニ、エゾバフンウニ、ムラサキウニの海藻群落に対する摂食圧が磯焼けの持続因であることがウニの除去実験によって検証され、主にコンブ



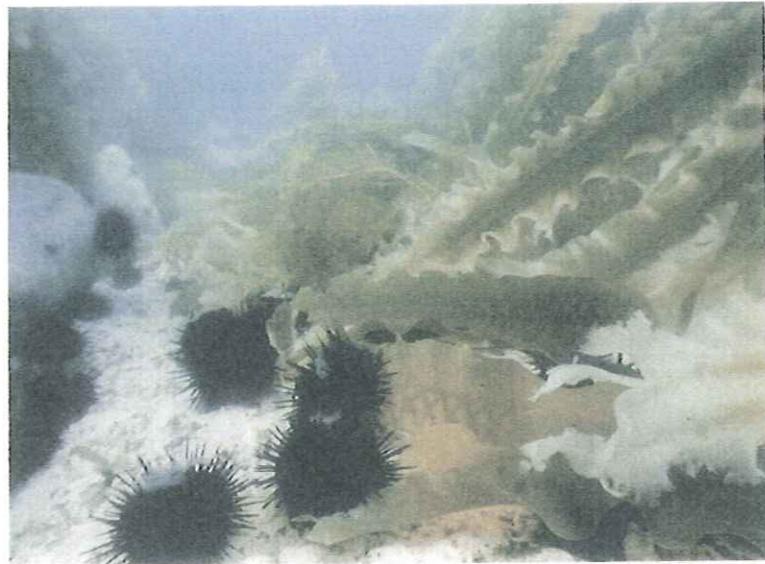
目海中林の造成に成功してきた<sup>30)~32)</sup>。しかし、他の主要な漁獲対象種であるバフンウニ、アカウニ、シラヒゲウニの海藻群落に対する高い摂食圧は報告されていない。種による個体群密度、食物の種類、摂食量、摂食様式の相違に起因するのかもしれない。

無節サンゴモは、成長に伴って表層を剥離する<sup>33)</sup>ので他の海藻の着生を阻害して磯焼けが持続するとの報告がある<sup>34)</sup>。しかし、この作用は無節サンゴモと着生する海藻の水温に対する生理学的な閾値の相違を反映し、海況条件に対応して温度依存的に発現するので、磯焼け持続の主因ではない<sup>2)</sup>。現に、磯焼けが持続している北海道寿都湾の無節サンゴモ群落においては、温暖な海況下では、ウニ除去後にヒバマタ目褐藻フシスジモク海中林が形成された<sup>35)</sup>(図5)。寒冷な年にはホソメコンブ群落も形成されることも明らかになっている<sup>2)</sup>。

現在、地球温暖化が進行することにより、高水温・貧栄養の環境が長期に持続しており、ウニを除去してもコンブ目海中林が形成されない事例も認められている<sup>36)</sup>。磯焼け発生後も高水温・貧栄養が続くと、マコンブは冬季～春季に、幼体では急激に成長が阻害されて死亡し、若齢体では物質の蓄積と成長が阻害される<sup>28)</sup>。このため、コンブ目褐藻の加入量の低下がもたらされて磯焼けが持続している。また、無節サンゴモの着生阻害作用も発現していると考えられる。

## 5 おわりに

地球温暖化は、表層の海水温の上昇のみならず、降水量の増加による成層



(北海道立中央水産試験場より提供)

図4 キタムラサキウニのホソメコンブ群落への摂食移動(北海道寿都湾)



図5 ウニ除去によるヒバマタ目褐藻フシスジモク海中林の造成(北海道寿都湾)

構造の強化によって鉛直混合を弱め、底層からの豊富な栄養塩の供給を減少させて一次生産を低下させることが懸念される。現に、親潮域では表層の低塩化による成層の強化が確認されている<sup>37)</sup>。秋田県男鹿半島沿岸では、冬季の爆弾低気圧による大時化でヒバマタ

目海中林が海底からはぎ取られて大規模に崩壊している<sup>36)</sup>。温暖化に伴い、偶然性の高い攪乱は今後多発する可能性が高い。また、アイゴ、イスズミ、ブダイなど植食魚類の食害による海中林の崩壊が太平洋中部海域まで認められるようになった。



北日本沿岸では、コンブ目海中林が著しく縮小して磯焼けが進行し、海中林構成種もコンブ目からヒバマタ目への交代が認められ<sup>38)</sup>、ウニの生物生産の低下がもたらされている<sup>39)</sup>。日本では今まで、海中林の造成は磯焼けの持続因であるウニの摂食圧の対策に最も力が注がれてきた。磯焼けの発生因である高水温・貧栄養の海況に対して無力であったからである。しかし、最近の研究から、マコンブは発芽から幼体期に富栄養条件であれば高水温でも成長できる<sup>28)</sup>ことがわかった。海域に海藻が吸収できる無機態の栄養塩を添加することによって、磯焼け域に海中林を造成できる可能性が高い。

今後、磯焼けのしくみをさらに明確にするためにコンブ目およびヒバマタ目褐藻と無節サンゴモの環境に対する相互の応答を詳細に明らかにする必要がある。同時に、知見の少ないヒバマタ目海中林とウニを中心とする植食動物間の相互作用を明らかにするための研究が必要である。

〔文 献〕

1) 遠藤吉三郎, 海産植物学, 初版, 博文館, 1911.  
 2) 谷口和也, 磯焼けを海中林へ: 岩礁生態系の世界, 裳華房, 1998.  
 3) Dayton, P. K. *Fish. Bull.*, **73**, 230-237 (1975).  
 4) Simenstad, C. A., Estes, J. A. & Kenyon, K. W. *Science*, **200**, 403-411 (1978).  
 5) Estes, J. A., Tinker, M. T., Williams, T. M. & Doak, D. F. *Science*, **282**, 473-476 (1998).  
 6) Steneck, R. S., Graham, M. H., Bourque, B. J., Corbett, D., Erlandson, J. M. *et al. Env. Cons.*, **29**, 436-459 (2002).  
 7) Vadas, R. L. & Steneck, R. S. *J. Phycol.*, **24**, 338-346 (1988).  
 8) Miller, R. J. *Mar. Biol.*, **84**, 275-286 (1985).  
 9) Hart, M. W. & Scheibling, R. E. *Mar. Biol.*, **99**, 167-176 (1988).  
 10) Scheibling, R. E., Hennigar, A. W. &

Baleh, T. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **56**, 2300-2314 (1999).  
 11) Harris, L. G. & Tyrell, M. C. *Biol. Inv.*, **3**, 9-21 (2001).  
 12) Chapman, A. S., Scheibling, R. E. & Chapman, A. R. O. Species introductions and changes in marine vegetation of Atlantic Canada. In: Claudi, R., Nantel, P. & Muckle-Jeffs, E., editors: *Alien invaders in Canada's waters, wetlands and forests*, Canadian Forest Service, Science Branch, Ottawa, 2002, p. 133-148.  
 13) Mann, K. H. *Science*, **182**, 975-981 (1973).  
 14) North, W. J. *Nova Hedwigia*, **32**, 1-68 (1971).  
 15) Dayton, P. K. *Ecol. Monogr.*, **55**, 447-468 (1985).  
 16) Leighton, D. L., Jones, L. G. & North, W. Ecological relationships between giant kelp and sea urchins in southern California. In: Young, E. G. & McClachlan, J. L., editors: *Proceedings of the 5th International Seaweed Symposium*, Oxford, UK, Pergamon Press, Oxford, 1966, p. 141-153.  
 17) Watanabe, J. M. & Harrold, C. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **71**, 125-141 (1991).  
 18) Pearse, J. S., Costa, D. P., Yellin, M. B. & Agegian, C. R. *Fish. Bull. U.S.*, **75**, 645-648 (1977).  
 19) Cowen, R. K., Agegian, C. R. & Foster, M. S. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **64**, 189-201 (1982).  
 20) Harrold, C. & Reed, D. C. *Ecology*, **66**, 1160-1169 (1985).  
 21) Fegner, M. J. & Dayton, P. K. *Adv. Ecol. Res.*, **17**, 243-279 (1987).  
 22) 谷口和也, 日本誌, **62**, 765-771 (1996).  
 23) Taniguchi, K., Kurata, K., Maruzoi, T. & Suzuki, M. *Fish. Sci.*, **60**, 795-796 (1994).  
 24) Agatsuma, Y., Seki, T., Kurata, K. & Taniguchi, K. *Aquaculture*, **251**, 549-557 (2006).  
 25) Litter, M. M. & Litter, D. S. *Am. Nat.*, **116**, 25-44 (1980).  
 26) 谷口和也, 歳多一哉, 鈴木稔, 化学と生物, **32**, 434-442 (1994).  
 27) Agatsuma, Y., Endo, H. & Taniguchi, K. *Fis. Sci.*, **74**, 837-841 (2008).  
 28) 成田美智子, 吾妻行雄, 荒川久幸, 海中林の形成に及ぼす環境の影響. (谷口和也, 吾妻行雄, 嵯峨直恆・編著, 磯焼けの科学と修復技術, 恒星社厚生閣, 2008, p. 34-48.)  
 29) 吾妻行雄, 川井唯史, 日本誌, **63**, 557-562 (1997).  
 30) 吾妻行雄, 北海道日本海沿岸における藻場修復. (谷口和也・編, 磯焼けの機構と藻場修復, 恒星社厚生閣, 1999, p. 84-97.)  
 31) 關晋夫, 東北太平洋沿岸における藻場修復. (谷口和也・編, 磯焼けの機構と藻場修復, 恒星社厚生閣, 1999, p. 98-110.)  
 32) 四井敏輝, 九州沿岸における藻場修復. (谷口和也・編, 磯焼けの機構と藻場修復, 恒星社厚生閣, 1999, p. 111-120.)  
 33) Masaki, T., Fujita, D. & Hagen, N. T. *Hydrobiologia*, **116/117**, 218-223 (1984).  
 34) 正置富太郎, 磯焼け. (大石圭一・編, 海藻の科学, 朝倉書店, 1993, p. 10-11.)  
 35) 吾妻行雄, 松山恵二, 中多章文, 川井唯史, 西川信良, 日本誌, **63**, 672-680 (1997).  
 36) 谷口和也, 成田美智子, 中林信康, 吾妻行雄, 磯焼けの原因と修復技術. (谷口和也, 吾妻行雄, 嵯峨直恆・編著, 磯焼けの科学と修復技術, 恒星社厚生閣, 2008, p. 123-134.)  
 37) 伊藤進一, 清水勇吾, 夏茂徳, 青雲宏明, 桑田晃, 他, 月刊海洋, **38**, 161-167 (2006).  
 38) 谷口和也, 海中林. (鷗谷いづみ・編, 消える日本の自然, 恒星社厚生閣, 2008, p. 210-218.)  
 39) Endo, H., Nakabayashi, N., Agatsuma, Y. & Taniguchi, K. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **352**, 125-135 (2007).



吾妻 行雄 Yukio Agatsuma

東北大学 大学院農学研究科 資源生物科学専攻 水圏植物生態学分野 准教授  
 略 歴: 1978年, 東北大学農学部卒業, 博士(農学)。北海道立水産試験場, 北海道原子力環境センターを経て, 1997年より現職。  
 専 門: ウニと海中林の種間相互作用に関する群集生態学的研究  
 著 書: [共著]「磯焼けの機構と藻場修復」〔水産学シリーズ〕120, 谷口和也・編, 恒星社厚生閣, 1999; [共著]「ヒトデ学: 棘皮動物のミラクルワールド」(本川達雄・編, 東海大学出版, 2001); Status and management of world sea urchin fisheries. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.*, **40** (2002); [co-authored] *Sea Urchins: Fisheries and Ecology* (editors: Lawrence, J. M. & Guzmán, O., DEStech Publication, 2003); [co-authored] *Edible Sea Urchins: Biology and Ecology*, 2nd ed. (editor: Lawrence, J. M., Elsevier, 2007); [編著]「磯焼けの科学と修復技術」(谷口和也, 吾妻行雄, 嵯峨直恆・編, 恒星社厚生閣, 2008); [共著]「ウニ学」(本川達雄・編, 東海大学出版, 2009) など